

遮音・吸音材料の基礎事項

Materials for Sound Insulation and Absorption

1. 音響材料とは その種類と役割

一般に音響材料というときには、スピーカやマイクロホンなどの音響機器を構成する材料を含めて、非常に広い範囲の材料を意味しているが、普通には建築音響、騒音対策の分野で各種の音響処理に使われる材料をいうことが多い。

この範囲の音響材料は、その機能や用途からみて遮音材料、吸音材料、防振材料（弾性支持材料）及び制振材料の4種類に区分されている。実際にこれらの材料を使うときには、各種類ごとの材料の機能あるいは役割を正確に理解した上で、用途に適応した材料を選定し、適用することが最も重要である。

従来、音響材料を使ったのに期待したほどの効果がえられなかったというクレームが、使われた材料に向けられてきた例が少なくないが、そのなかには材料の責任というよりは、材料の選定や使い方を誤ったことが原因になっている例が多いと考えられる。

本文では、こうした面に重点を置いて上記音響材料のうち遮音・吸音材料の基礎的な性能や使い方の重点などについて解説を行っておくことにする。

2. 遮音材料

2.1 遮音材料の役割と性能の評価

遮音材料は、一般に空気伝搬音の騒音対策において最も重要な役割をする材料となっている。集合住宅を始めとした各種建築物における界壁・間仕切壁や外周壁については、遮音性能が重要な役割をすることが多い。

遮音材料の性能評価には、図1に示すように材料に入射する音の強さ I_i 、反対側から放射される音の強さ I_t とから、次式で求められる透過率 τ 又は音響透過損失 R (dB) が使われる。

$$\text{透過率} \quad \tau = \frac{I_t}{I_i} \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{音響透過損失} \quad R = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t} = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad \dots\dots(2)$$

音響透過損失は、普通には JIS A 1416 (実験室におけ

る音響透過損失測定方法)に従って測定される。資料集・カタログなどに掲載されている遮音材料の実用的なデータは、すべてこうして求められた音響透過損失で表示されているが、部分的に性能が異なった材料で構成された壁面などの総合透過損失を求めるためには、透過率のデータを使うことが必要になる。

2.2 遮音材料の基礎的な音響透過損失特性

(1) 一重壁

気密な均質材料で構成されている一重壁の音響透過損失特性は、基本的には質量則理論によって与えられ、これにコインシデンス効果による特性周波数での音響透過損失の低下を加味すれば、かなり正確に実測値を予測することができる。

質量則というのは、音が材料の一面に当たったときの振動速度は、材料の質量（面密度）によって規定され、その振動速度が反対側の面から放射される音をきめるので、質量が大きいほど遮音性能も大きくなるというものである。この場合の質量則による音響透過損失 R は、次の(3)式によって計算される。

$$R = 20 \log_{10} \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) - 10 \log_{10} \left\{ \log_e \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right] \right\} \quad \text{(dB)} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$: 角周波数 m : 材料の面密度 (kg/m^2)、 ρ : 空気の密度 (kg/m^3)、 c : 音速 (m/s) である。

いくつかの面密度の材料について、質量則による音響透過損失の計算値を図2に示す。

一方コインシデンス効果は、音が斜方向から材料に当たったときに、材料に生じた曲げ振動の作用によって、あたかも材料がないかのように反対側に音があらわれるために、実際の音響透過損失が質量則から予測される値よりもはるかに低くなる現象である。このコインシデンス効果のおこる周波数は、材料の曲げ剛性のほかに音の入射角度に関係する。その最低周波数（コインシデンス限界周波数） f_c は、次の(4)式によって求められる。

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho_m(1-\sigma^2)}{E}} \quad \text{(Hz)} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 h : 材料の厚さ (m)、 ρ_m : 材料の密度 (kg/m^3)、 E : 材料のヤング率 (N/m^2)、 σ : 材料のポアソン比、 c : 音速 (m/s) である。

コンクリート、軽量気泡コンクリート板などによる一重壁構造は、厳密な意味では均質材料ではないが、実用的には質量則を適用して音響透過損失を求めてもよい。

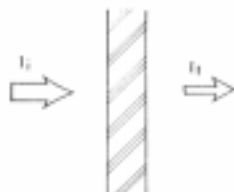


図1 遮音材料の透過率、音響透過損失を定義する量

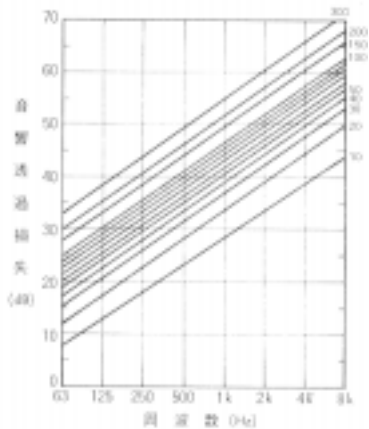


図2 質量則による音響透過損失の計算値（各曲線の右端の数値は面密度 (kg/m²) の値を示す）

主要な材料について、質量則による計算値と実験値と実験室で測定された音響透過損失値を比較して図3～5に示した。

実測値が質量則以下になるのは、コインシデンス効果の影響（図3～4）あるいは通気性の影響（図5）であり、図のいくつかにはその改善例もあわせて示した。

(2) 中空層構造

a) 基本特性

中空層をもつ複合構造の音響透過損失は、均質一重壁や積層板のように質量則によって予測値を求めることはできない。この場合の理論的な検討も行われているが、実用面での性能予測に十分利用できるまでには至っていない。

中空二重壁構造の透過損失特性の基本的な傾向を、図6の例で説明しておく。この図の破線で示した質量則に

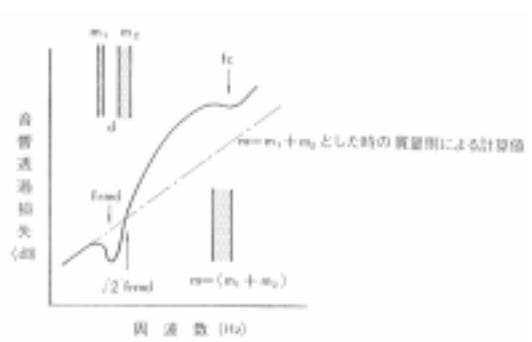


図6 中空壁構造の遮音特性の一般的傾向

よる計算値というのは、両側表面材の面密度の和と同じ面密度をもった一重壁について、質量則を適用して求められた値である。

図中低音域において破線で示される質量則値よりも実測値が低下する現象は、共鳴透過現象と呼ばれるもので、その周波数 f_{rmd} は(5)式で求められる。

$$f_{rmd} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \cdot \frac{\rho c^2}{d}} \quad (\text{Hz}) \quad \dots\dots (5)$$

ここで m_1, m_2 : 表面材それぞれの面密度 (kg/m²), d : 中空層の厚さ (m) である。

音響透過損失の実測値は、 $\sqrt{2} f_{rmd}$ の周波数で質量則による値とほぼ同じになり、それ以上の周波数で表面材のコインシデンス周波数領域までは、質量則の値より大きくなる傾向がある。すなわち、中空壁構造が遮音材料として有効なのは $\sqrt{2} f_{rmd}$ 以上の周波数範囲ということになる。

実際の中空壁構造の遮音特性については、壁構造を構成する表面材、中空層および下地構造などが、それぞれ

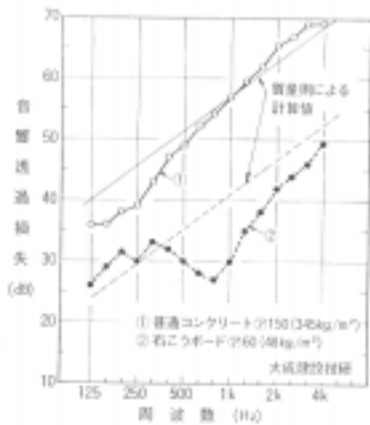


図3 コンクリート、石こうボードの音響透過損失

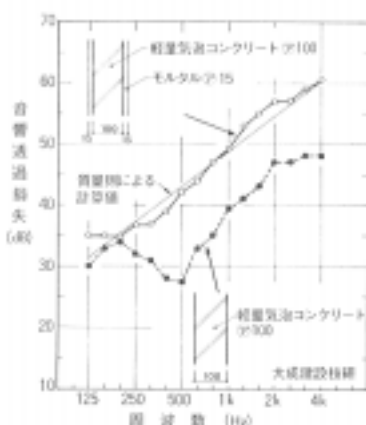


図4 軽量気泡コンクリート壁の音響透過損失

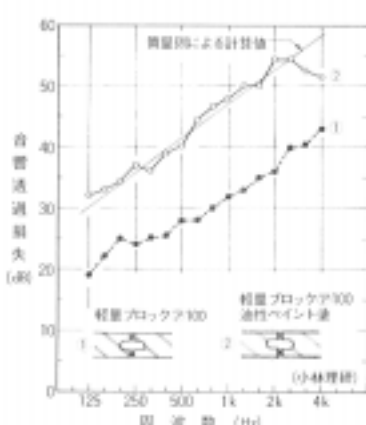


図5 コンクリートブロックの音響透過損失

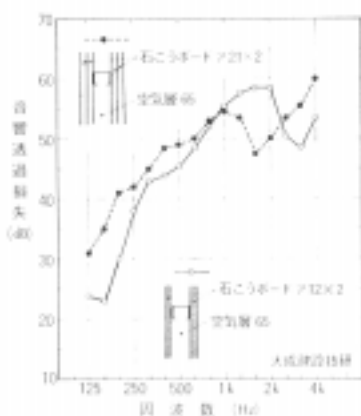


図7 種類・厚さの同じ材料を積層して表面材にした中空二重構造の音響透過損失

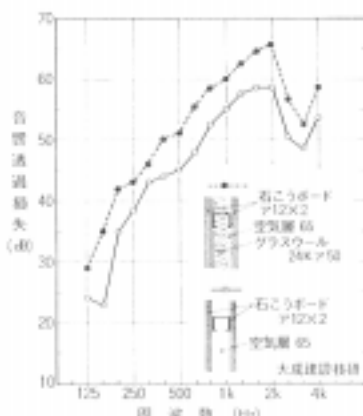


図8 中空層に挿入した多孔質材料の効果

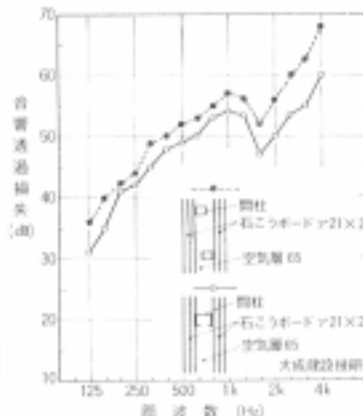


図9 スタッドの違いによる音響透過損失の変化

相互に関連をもって音響透過損失特性を規定することになる。ここでは実験室における測定結果から、上記の各要因がそれぞれ単独に音響透過損失に影響を与えるものとして、実例によってそれぞれの要因の役割を解説しておく。

b) 表面材の影響

同じ厚さの石こうボードを鋼製スタッドの両側に二層ずつ重ね貼りした中空壁構造について、その音響透過損失の例を図7に示した。

表面材の面密度を増すことは、一般的には音響透過損失を大きくする傾向をもっている。ただし、同一種類の材料では、材料の厚さを増すとコインシデンス効果のおきる周波数が低音側に移動するので、対象騒音の周波数特性によっては、表面材の厚さを増すことが必ずしも遮音性能の向上に結びつかないことに注意しなければならない。

図7で高周波数域における音響透過損失の低下は、表面材二層の合計厚さから想定されるコインシデンス限界周波数よりも高周波側で、表面材一層分の厚さを使って求められるコインシデンス限界周波数に近い値でおこっている。これは、一般的には表面材の厚さを増すことによっておこるコインシデンス効果の悪影響を低減するのに役立つことであり、多層貼表面材を採用する利点の一つにあげられる。特に厚さの異なるボードや種類の異なるボードを積層した表面材で構成した中空壁構造の場合には、コインシデンス周波数近傍での音響透過損失の低下が小さくなる傾向が見とめられている。

c) 中空層の厚さの影響

中空層の厚さを変えると、(5)式からわかるように共鳴透過周波数が増える。一般的には、中空層の厚さを増すことによって、音響透過損失値の低下する周波数領域が、通常の遮音設計で対象になる周波数以下にならう

にすることができる。

d) 中空層への多孔質材料の挿入効果

中空層にグラスウールなどの多孔質材料を挿入すると、図8に示すように一般に遮音性能が向上する傾向が認められる。ただこの場合の音響透過損失の改善量は、挿入する多孔質材料の仕様だけでなく、表面材や間柱など中空壁構造の全体的な構成に関係するので、定量的な予測はむずかしい。実験室における音響透過損失測定データを参考にすることが必要である。

e) 間柱の影響

鋼製スタッドを千鳥配置（ランナーは共通）にした形式と、同一のスタッドの両側に表面材を貼った形式の壁構造を比較すると、千鳥配置の方が大きな透過損失値がえられている。図9にその例を示す。

(3) 躯体構造に仕上材を付加した構造

同じ中空壁構造であっても、コンクリートあるいは軽量気泡コンクリート壁の表面に特殊ボンドの塊を一定間隔で取り付け、これに石こうボードを圧着固定した壁構造では、図10に示すように低音域、高音域での音響透過損失が躯体自身の値よりも小さくなる。したがって、この構造を音響的に重要な間隔に使用することには注意が必要である。

ただ、このように石こうボードを付加する工法（ボンド工法）は、室内仕上面から開発された工法として施工上の利点が大いいために、今後も広く使用される可能性があり、遮音性能面での欠陥を除去した工法の開発が、重要な課題になっている。ここでは、既存壁改修工法の一例を図11に示しておく。

(4) 窓の遮音特性

外部騒音が建物に侵入したり、建物内の騒音が周辺に伝わるのを防止するために最も重要な役割をするのは、外壁の遮音性能であり、通常は窓・扉・換気口などの開

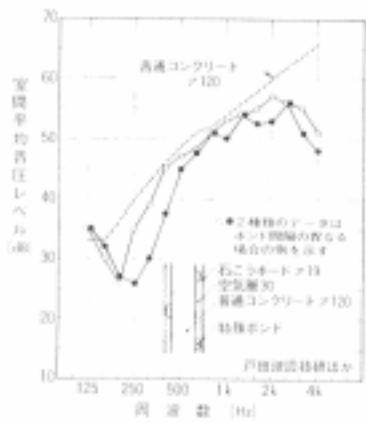


図10 ボンド工法がコンクリート壁の遮音性能に与える影響

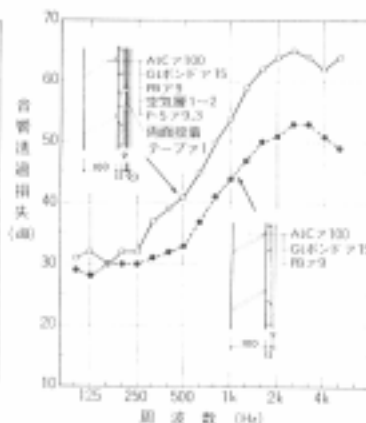


図11 鉛遮音板を使ったボンド工法壁の遮音改修の例

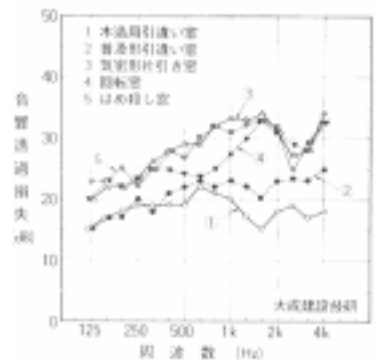


図12 各種形式の窓サッシの音響透過損失

口部の性能が、外壁全体の遮音性能を規定していることが多い。

ガラス窓及び戸の音響透過損失は、板ガラス自身の音響透過損失とサッシの気密性などによって決まる。このうち、板ガラスの音響透過損失は(1)の一重壁の項でのべた質量則とコインシデンス効果によって規定されるとしてよいが、実際に窓の遮音性能に最も影響が大きいのは気密性で、召合せ部分に隙間ができると、中音域から高音域にかけて音響透過損失は著しく低下する。

窓サッシの種類による音響透過損失変化の例を図12に示す。窓としてさらに大きな音響透過損失を必要とするときには、壁の場合と同様に二重窓を採用する。

気密性を確保するために、サッシにはゴムなどの気密材、シール材が使われている。これに対しては開閉の繰り返しによる性能の低下を防止することが重要である。

3. 吸音材料

3.1 吸音材料の役割と性能の評価

吸音材料は、室内の響きの調整や空気伝搬騒音の対策などに広く使われている。特に騒音対策においては、室内の内装のほかに空調設備などの消音機、機械などの防音エンクロージャ、遮音構造の構成要素など各方面に使われる。

こうした各種の用途における吸音材料の役割は、主として材料からの反射音を減少させることである。そのために吸音材料の性能評価には、図13に示すように材料に入射する音の強さ I_i 、反射音の強さ I_r とから、次式で求められる吸音率 α が使われる。

$$\text{吸音率} \quad \alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i} \quad \dots\dots(6)$$

一般に吸音率は音の入射角度によって変化するので、吸音材料の性能表示には、すべての方向からランダムに音

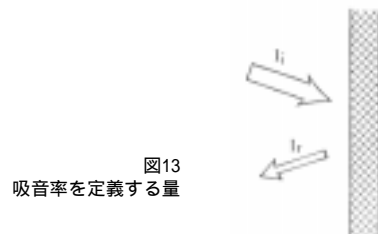


図13 吸音率を定義する量

が入射する条件に相当する量として、JIS A 1409 (残響室法吸音率の測定方法)に規定される方法で測定された残響室法吸音率が使われており、資料集・カタログなどに掲載されている吸音材料の実用的データは、ほとんどこれによって表示されている。

3.2 吸音材料の基礎的な吸音特性

現在実用されている吸音材料は、外観、吸音特性の特徴などによって、いくつかの種類に区分されており、用途に応じて使い分けが必要である。ここでは、主要な吸音材料の種類ごとに、吸音特性の特徴を示す。

(1) 多孔質材料

広い周波数範囲にわたって大きな吸音率をもった材料として、多孔質材料が吸音材料の主力になっている。実用面ではグラスウール・ロックウールなどの無機質繊維材料が多用されている。そのほかにポリウレタンフォームなどの高分子発泡材料があるが、吸音機構からいって多孔質材料の範囲に含まれるのは、連続気泡材料である。すなわち、吸音材料としての多孔質材料の構造上の特徴は、材料の中に連続した小さな隙間や気泡があって、適度の通気性をもっていることである。

一般にこれら多孔質材料の吸音特性は、材料の種類のほか、厚さ、密度、使用条件などに関係する。

a) 材料の厚さ

同一種類の多孔質材料で、その厚さを変えたときの吸音性の代表例を図14に示した。

多孔質材料の吸音率は、一般に周波数の増加とともに

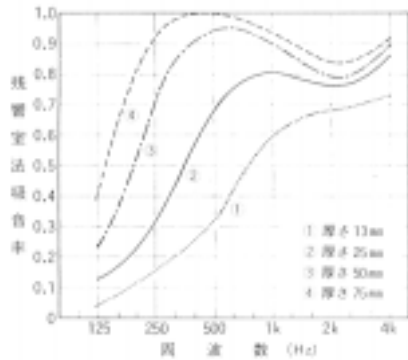


図14 多孔質材料の吸音特性の厚さによる変化

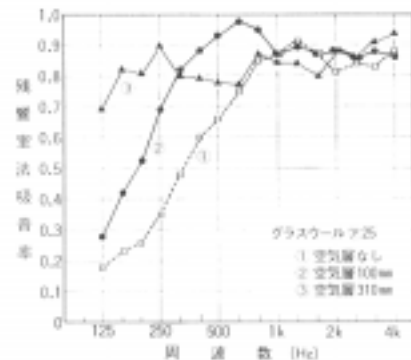


図15 多孔質材料の吸音特性に対する背後空気層の影響

大きくなり、ある周波数でほぼ一定値に達する。そして厚さの増加にともなって中低音域の吸音率が上昇し、吸音材料として有効な周波数領域が広がっている。同一種類の材料について、中低音域の吸音率を規定する最も重要な材料の仕様は厚さであり、この領域での吸音率の必要度に応じて、材料の厚さを選定するのが原則になる。

b) 密度（流れ抵抗）

同一種類の材料で、厚さも同じときには、密度が大きいほど吸音率も大きくなる傾向にある。ただ前項でのべた材料の厚さにくらべると、密度の影響は小さい。

実際に繊維質材料についていえば、密度が同じでも繊維径や成形状態によって吸音率が変化する。このために、多孔質材料の品質仕様としては密度よりも流れ抵抗の方が有効であるとして、その測定なども行われているが、わが国ではまだ実用化されるには至っていない。

c) 使用条件

多孔質材料の吸音特性に対する影響として重要なのは、背後空気層と表面処理（仕上げ）の問題である。

さきの図14に示すように、剛壁密着の状態では低音域まで大きな吸音率をうるためには、材料の厚さを増すことが必要になる。その代りに、多孔質材料の背後に空気層を設ける方法が使われることがある。背後空気層の厚さを増すことによって、低音域までの広い周波数範囲にわたって吸音率を大きくする例を図15に示す。

また普通の多孔質材料では、強度や意匠上の要求などによって、表面仕上げをして使うことが多い。この仕上げの種類によっては、素材の吸音特性が変化する場合がある。基本的な吸音特性への影響を示す例が、図16である。通常の周波数範囲（125Hz～4kHz）で、グラスウール・ロックウールなどの多孔質材料の吸音特性をそのまま必要とする場合に適用できる表面処理の主要な方法をまとめて表1に示した。

(2) ロックウール・グラスウール吸音板

広い意味では多孔質材料の範囲に含まれるものである

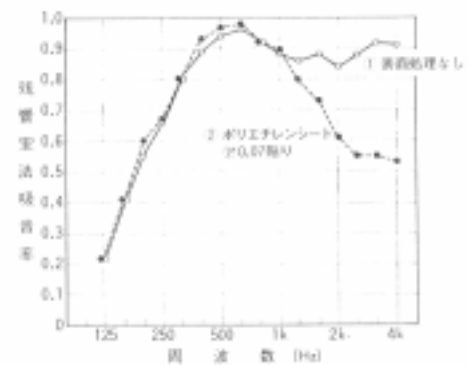


図16 多孔質材料の表面処理をした場合の吸音特性の例

表1 多孔質材料の表面処理の方法

材 料	条件・使用上の注意
メタルラス エクスパンドメタル 網	特になし
通気性の大きい織物（サラックロス、ヘシアンクロス、グラスクロスなど）	接着剤、塗料などで布目をふさがぬこと（全面のり貼、和紙裏打などを避ける）
薄膜（ポリエチレン、ビニルフィルムなど）	厚さ0.05mm程度以下、張力をかけないで貼ること
あなあき金属板	開口率>0.20、なるべく小さいあな径
リップ構造	リップ幅数cm程度以下、リップ中心間隔はリップ幅の倍以上

が、ロックウールやグラスウールを高密度の板状に成形し、内装材などとしてそのまま使うことのできる製品である。

この種の材料では、成形方法や表面仕上げ方法などに関係して、製品の種類による吸音率の値の差異はかなり大きい。しかし全般的な傾向として、多孔質材料の基本になる中・高周波数域を主要な吸音領域とした吸音特性をもっており、一般的な用途に適した材料である。

図17に示したロックウール吸音板の吸音特性の例は、

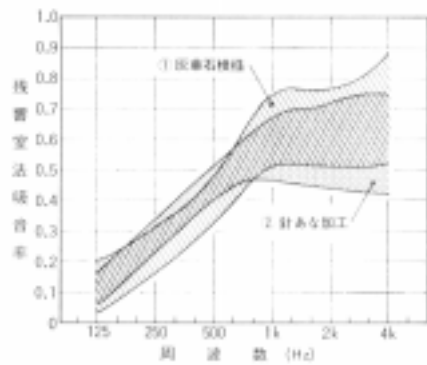


図17 ロックウール吸音板の吸音特性（厚さ9～12 mm，剛壁または石膏ボード捨貼下地）

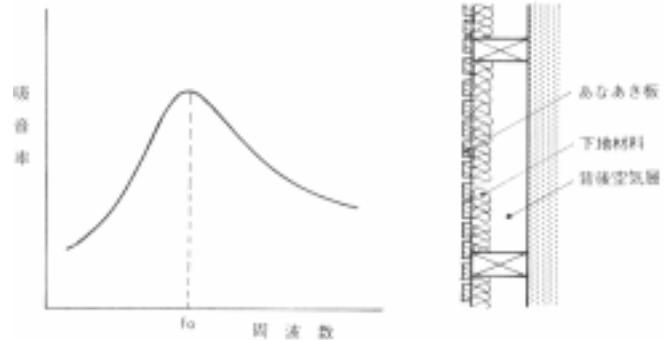


図18 あなあき板構造の吸音特性の傾向

吸音板を剛壁あるいは石膏ボード捨貼下地に密着施工したときのものである。石膏ボード捨貼下地工法を用いた場合には、背後空気層の影響はほとんど受けないと考えてよい。

(3) あなあき板構造

合板、石膏ボード、石綿セメント板、けい酸カルシウム板などに貫通した多数のあなをあけた材料は、吸音板として普及しているが、あなあき板そのものを吸音材として取り扱うのは不適當であり、図18のようにあなあき板の背後に空気層を設けた構造にしたとき、特性の周波数（共鳴周波数）を中心にした山形の吸音特性を示すものである。

すなわち、あなあき板構造では、使用目的に適合するように吸音領域を設計することが必要であり、これがあなあき板構造の適確な利用につながることになる。このあなあき板構造の吸音特性を規定する要因としては、あなあき板の仕様（板厚、あな径及びあなピッチ）と使用条件（背後空気層の厚さ及び下地条件）があげられ、あなあき板の材質は吸音特性に本質的に影響がない。

上記の各要因のなかで、あなあき板の仕様と背後空気層の厚さは、吸音率が最大になる共鳴周波数に関係し、下地材料は吸音率の大きさに関係する。

a) 共鳴周波数

主要な吸音領域をきめる共鳴周波数 f_0 は、背後空気層の厚さが500mm程度以下であれば、次式で算出される。

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{(t+0.8d)L}} \quad (\text{Hz}) \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 c ：空気中の音速（m/s）、 t ：板厚（m）、 d ：あなの直径（m）、 p ：開口率、 L ：背後空気層の厚さ（m）である。

実際にあなあき板構造を使った吸音設計を行うときの参考として、各構造要因と吸音特性との関係についての

測定例を以下に示す。

従来の設計図書では、ただあなあき板としか記載されていない例があり、また施工段階で指定されたあな径・ピッチとちがったあなあき板が使われている例もみられるが、あなあき板の仕様は、(7)式に示されるように主な吸音領域をきめる共鳴周波数を規定する要因として重要である。

図19はあな径・ピッチの異なる2種類の吸音構造による吸音特性を比較して示したものである。また図20は、同一仕様のあなあき板で背後空気層を変えたときの吸音特性を示したもので、空気層が大きくなるにしたがって吸音率の最大となる周波数が低周波数側に移動している。

b) 下地材料

あなあき板の背後空気層にグラスウール・ロックウールなどの多孔質材料を挿入したり、布などを付加することによって、共鳴周波数を中心にした吸音領域の吸音率をきくすることができる。

同一のあなあき板構造において、下地材料の種類を変えたときの吸音特性を図21に示す。この図の例では、下地材料はあなあき板のすぐうしろに取り付けられている。こうした構造の場合に、施工が簡単であるという理由から、多孔質材料を剛壁（スラブ）側に取り付けることが多いが、図22の例に示すように、あなあき板側に取り付けたときに比べて、吸音率が相当小さくなることがあるので、設計・施工時における指示、監理が重要である。

(4) 新しい吸音材料

新素材あるいは複合機能材料の開発という最近の動向のなかで、吸音材料についてもいくつかの新製品が開発され、実用化されている。ただこれらの新製品を吸音特性の面からみると、既存の吸音材料よりも優れたものばかりではない。

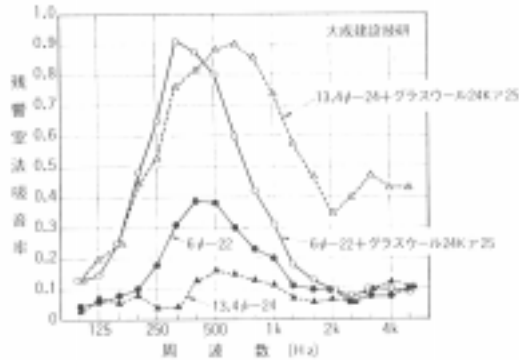


図19 あなあき板構造（あなあき石こうボード ア 9）の吸音特性に対するあな径・ピッチの影響

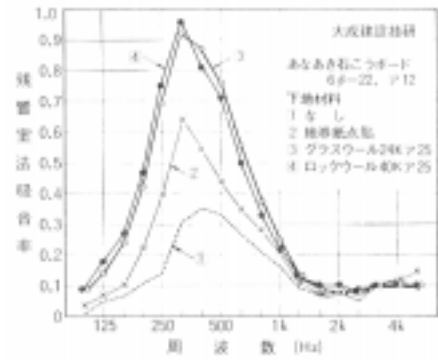


図21 あなあき板構造の吸音特性に対する下地材料の影響（背後空気層：75mm，下地材料位置：ボード側）

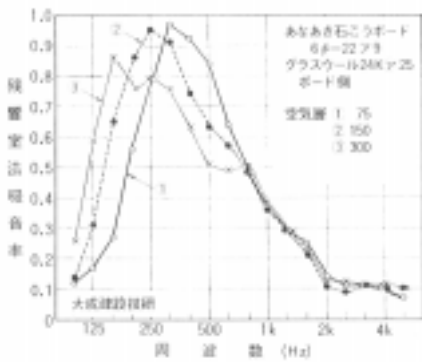


図20 あなあき板構造の吸音特性に対する背後空気層の影響

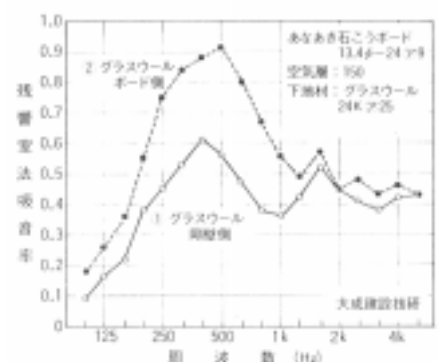


図22 あなあき板構造の吸音特性に対する下地材料の位置の影響

表2 吸音材料開発における性能項目と適用

適用性能項目	屋外 (防音壁等)	消火器	防音チャンバ (内貼)	地下室 (内装)	室内装
耐水性					
耐蝕性					
耐気流性					
耐紫外線					
意匠					

注) : 考慮する必要の多い項目
: 時に考慮する必要のある項目

最近における吸音材料の開発の重点は、吸音性能の向上というよりは、吸音材料の使用場所の条件に応じて要求される吸音性能以外の各種性能の改善に向けられているものが多いといつてよいであろう。ここで対象となっている諸性能と主な用途などを表2にまとめて示した。

セラミック吸音板、焼結金属板、吸音ブロック・レンガなどは、いずれもこうした方向での製品ということができる。

(音響工学研究所 子安 勝)

〔参考図書・文献〕

- 日本音響材料協会編、騒音・振動対策ハンドブック第2編 第4章、第6章（技報堂出版、1982）
- 久我進一、捨音材料（技報堂出版、1978）
- 子安 勝、吸音材料（技報堂出版、1976）
- 音響技術、No.21（特集・壁としゃ音）（1978）
- 音響技術、No.42（特集・せっこうボードと音響）（1983）
- 音響技術、No.48（特集・最近の吸音材とその動向）（1984）
- 騒音制御、Vol.9No.4（特集・建物の遮音）（1985）
- 騒音制御、Vol.10No.1（特集・吸音材と使用実例）（1986）